

УДК 514.18

DOI: 10.32347/0131-579X.2024.107.150-161

д. т. н., професор **Пилипака С.Ф.**,
s.pylypaka@nubip.edu.ua ORCID 0000-0002-1496-4615

д. т. н., професор **Несвідомін В.М.**,
vnesvidomin@nubip.edu.ua ORCID 0000-0002-1495-1718

к. т. н., доцент **Кресан Т.А.**,
tanyakresan@i.ua ORCID 0000-0002-8280-9502

аспірант **Хропост В.І.**,
hropost97@ukr.net ORCID 0000-0001-9363-3955

к. т. н., доцент **Бабка В.М.**
babka.v.m@gmail.com ORCID 0000-0003-4971-4285

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ПРУЖНОЇ ОСІ S-ПОДІБНОГО СТОЯКА КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ

При обробітку ґрунту на культиваторну лапу діє сила спротиву її переміщенню. Вона є змінної величини і викликає момент сили, прикладений до стояка лапи. Під дією моменту пружна вісь стояка змінює свою форму. Це впливає на положення лапи у ґрунті. Розглянуто форму S-подібного стояка, пружна вісь якого складається із двох дуг кіл однакового радіуса. При роботі культиватора одна частина стояка згинається, збільшуючи кривину пружної осі, а інша навпаки, розгинається, тобто її кривина зменшується.

В основу моделювання форми пружної осі стояка лапи покладено положення теорії опору матеріалів, згідно якого кривина пружної осі консольно защемленої смуги прямо пропорційна прикладеному моменту і обернено пропорційна її жорсткості. Якщо форма поперечного перерізу стояка по всій його довжині є незмінною і властивості металу теж однакові, то жорсткість є сталою. При невеликих прогинах смуги застосовують лінійну теорію згину, однак у стояка прогини значні, тому для цього випадку застосована нелінійна теорія. При цьому береться до уваги, що пружна вісь стояка уже має початкову кривину.

Якщо консольно защемлену прямолінійну смугу згинати силою, яка прикладена перпендикулярно до її вільного кінця, то смуга згинатиметься. При її деформації сила залишається перпендикулярною до кінця смуги, хоча в нерухомій системі координат вона змінює свій напрям. Така сила називається слідкуючою. При роботі культиватора виникає сила, яка прикладена до лапи. Складову цієї сили, перпендикулярну до кінця стояка і яка передається до нього від лапи, вважатимемо слідкуючою.

Для моделювання форми пружної осі S-подібного стояка лапи окремо розраховувалася деформація дуг кіл, які утворюють цю лапу. Момент сили в поточній точці пружної осі стояка розраховувався, як добуток слідкуючої сили, прикладеної до стояка в точці кріплення до лапи, на відстань, якою є довжина пружної осі від цієї до поточної точки на стояку. Для знаходження форми деформованих пружних осей обох частин стояка застосовувалися чисельні методи інтегрування. Потім їх з'єднували в одне ціле і отримували деформовану пружну вісь S-подібного стояка.

Ключові слова: деформація, кривина, згинання, пружинення, дуга кола, момент сили, жорсткість.

Вступ. На культиваторну лапу діють сили опору в результаті перерізання нею коріння бур'янів і рихлення ґрунту. Ці сили змінної величини передаються на стояк. Є різні форми стояків культиваторної лапи. Вони приймають пульсуючі динамічні навантаження, яких певним чином згладжують. Це призводить до періодичної зміни форми їх пружної осі. Пружна вісь деформується під дією прикладеного моменту і може займати свою початкову форму за відсутності нього, тобто відбувається пружинення стояка. В результаті такого пружинення культиваторна лапа частково змінює своє положення, що впливає на напрям входження леза у ґрунт та відхилення її ходу від заданої глибини.

Огляд літератури і постановка проблеми. Теорія нелінійного згину стержнів застосовується при їх значних прогинах. В праці [1] розглянуто згин прямолінійної консольно защемленої смуги під дією прикладеної до її вільного кінця зосередженої сили, поєднання зосередженої сили і моменту, а також розподіленої сили. Згинання смуги із заданою початковою кривиною у спіральну форму розглянуто в праці [2]. Розрахунок пружинного елемента кріплення робочого органу культиваторної лапи для підвищення рівномірності її ходу здійснено в праці [3]. В працях [4, 5] зроблено розрахунок прогину смуги при різних навантаженнях. Розрахунок деформації пружної осі стояка культиваторної лапи у вигляді дуги кола та інших кривих здійснено в праці [6].

Мета і задачі дослідження. Мета роботи: розробити аналітичний опис згинання пружної осі S-подібного стояка культиваторної лапи від дії на неї сили опору ґрунтового середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити аналітичний опис згинання верхньої частини пружної осі стояка у вигляді дуги кола, внаслідок якого кривина осі зменшується;
- розробити аналітичний опис згинання нижньої частини пружної осі стояка у вигляді дуги кола, внаслідок якого кривина осі збільшується;
- поєднати дві деформовані дуги у пружну вісь S-подібної форми для

порівняння із початковим положенням.

Матеріали та методи розрахунку деформації пружної осі стояка S-подібної форми.

Матеріали досліджень ґрунтуються на теорії нелінійного згину смуги, яка є складовою частиною загальної теорії опору матеріалів. При деформації пружної осі смуги змінюється її кривина при незмінній довжині дуги цієї осі. Розглянемо сказане на прикладі консольно закріпленої смуги 1, яка у вільному стані має криволінійну форму (рис. 1).

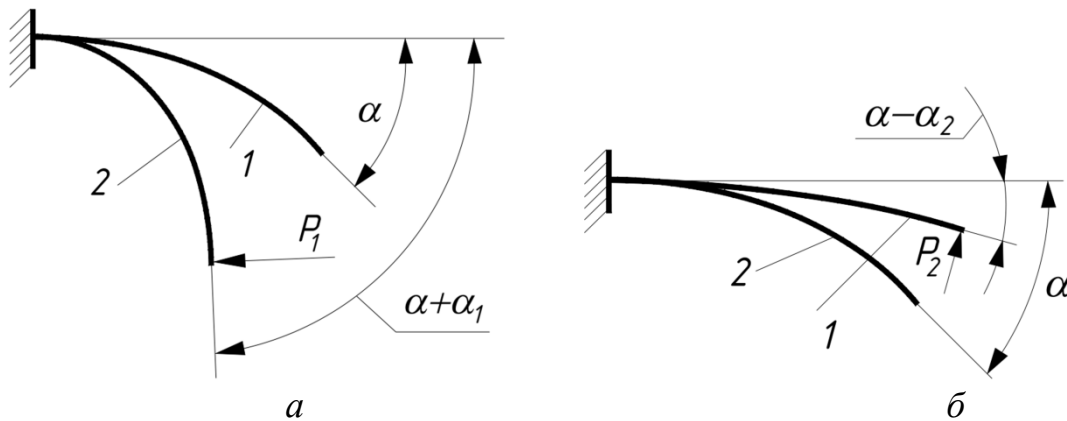


Рис. 1. Пружна вісь смуги у вільному стані – 1 і після прикладеної сили P – 2:
 а) прикладена сила P збільшує кривину пружної осі;
 б) прикладена сила P зменшує кривину пружної осі

У залежності від напрямку дії сили P , яка називається слідкуючою, оскільки залишається перпендикулярною до кінця осі в процесі її деформації, кривина осі може збільшуватися або зменшуватися. Кривину осі у вільному стані можна оцінювати кутом α , який або збільшується до $\alpha + \alpha_1$ (рис. 1, а), або зменшується до $\alpha - \alpha_2$ (рис. 1, б) в процесі її деформації. Однак величину кута потрібно співвідносити із довжиною s пружної осі. Границя цього відношення є кривою k кривої у поточній точці, тобто $da/ds = k$. В залежності від закономірності зміни кута α вздовж дуги кривої $\alpha = \alpha(s)$ залежить форма кривої. Якщо ця залежність лінійна, то кривина k є сталою величиною, а крива – дугою кола.

Для першого випадку (рис. 1, а) кривину k пружної осі після деформації можна записати наступним чином:

$$k(s) = \frac{d}{ds} (\alpha(s) + \alpha_1(s)) = k_0(s) + k_1(s), \quad (1)$$

де $k_0(s)$ – кривина пружної осі у вільному стані, тобто до деформації;
 $k_1(s)$ – додаткова кривина пружної осі, набута внаслідок дії моменту M_1 від прикладеної сили P_1 .

Відповідно для другого випадку (рис. 1, б) можна записати: $k = k_0 - k_2$. Додаткова кривина $k_1(s)$ згідно теорії опору матеріалів визначається із виразу:

$$k_1(s) = \frac{M_1(s)}{EI}, \quad (2)$$

де $M_1(s)$ – прикладений момент M_1 до криволінійної смуги у функції довжини дуги s її пружної осі;

EI – жорсткість смуги. Вона представляє собою добуток моменту інерції I поперечного перерізу смуги на модуль Юнга E .

Момент сили $M_1(s)$ є добутком сили P_1 на довжину дуги s від точки прикладеної сили P_1 до поточної точки пружної осі: $M_1 = P_1 s$. З урахуванням цього підставляємо (2) в (1) і отримуємо:

$$k(s) = k_0(s) + \frac{P_1 s}{EI} \quad \text{або} \quad \frac{d\alpha}{ds} = k_0 + \frac{P_1 s}{EI}. \quad (3)$$

Для іншого випадку (рис. 1, б), коли сила P_2 «випрямляє» пружну вісь, рівняння (3) набуває вигляду:

$$\frac{d\alpha}{ds} = k_0 - \frac{P_2 s}{EI}. \quad (4)$$

Рівняння (3) і (4) є так званими натуральними рівняннями пружної осі смуги після її деформації від початкової кривини k_0 у вільному стані до її збільшення або зменшення. Для побудови осі смуги за цими рівняннями використовується диференціальна геометрія кривих ліній. Перехід до параметричних рівнянь відбувається за відомими інтегралами:

$$x = \int \cos \alpha(s) ds; \quad y = \int \sin \alpha(s) ds. \quad (5)$$

Рівняння (5) потребують чисельних методів інтегрування оскільки параметричних рівнянь деформованої осі в кінцевому вигляді не існує.

Результати моделювання форми пружної осі S-подібного стояка культиваторної лапи

S-подібний стояк культиваторної лапи може мати різну форму. Головною властивістю стояка є те, що його умовно можна розділити на дві частини, вигнуті у протилежні сторони.

На рис. 2 показано кріплення стояка одним його кінцем до рами культиватора, а другий вільний кінець призначений для кріплення лапи. Під дією сили реакції ґрунту під час роботи культиватора стояк зазнає пульсуючих навантажень, внаслідок чого змінює форму своєї пружної осі.

Ще один стояк із деякими розмірами (рис. 3) взято із реклами за посиланням [7].

Судячи з обох зображень стояків (рис. 2, 3), пружна вісь їх верхньої частини подібна до дуги кола, нижня – до частини параболи. Для спрощення розрахунків в статті обидві частинами замінено дугами кіл. Це не звужує загального підходу і може бути застосовано і для дуг інших кривих.

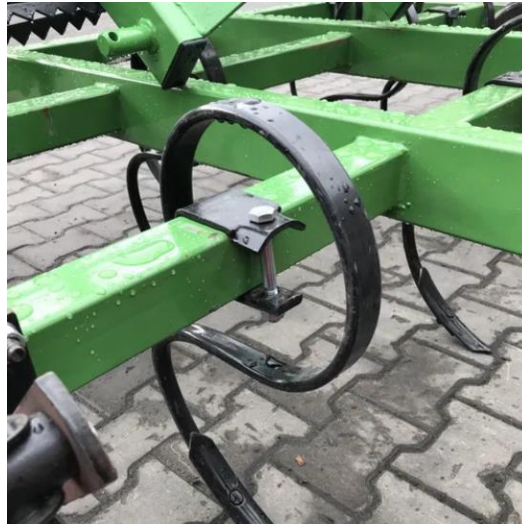


Рис. 2. Стояк лапи S-подібної форми на рамі культиватора

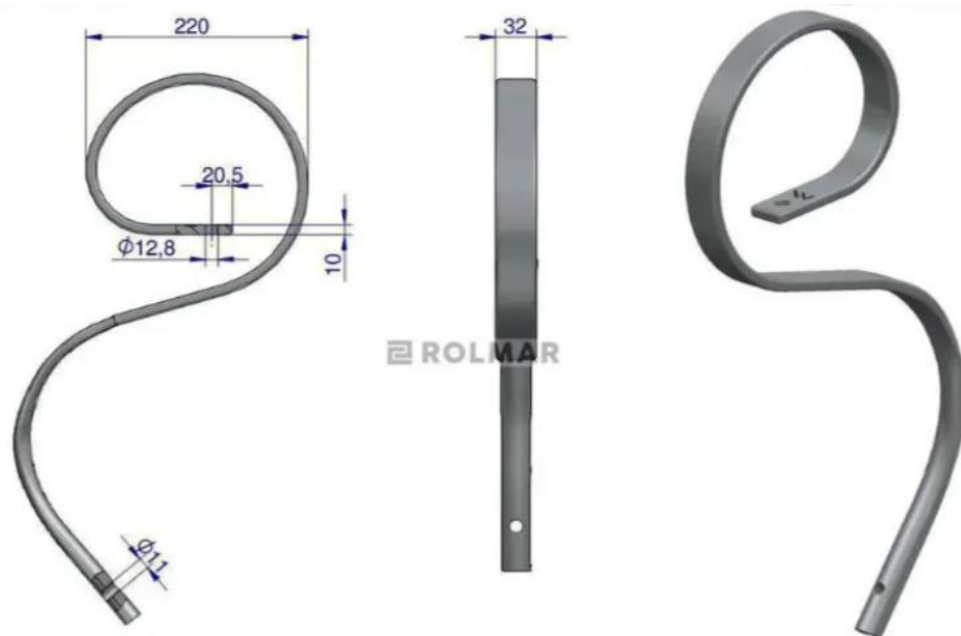


Рис. 3. Проекції та наочне зображення S-подібного стояка із деякими розмірами

Аналітичний опис згинання пружної осі нижньої частини стояка, внаслідок якого кривина осі зменшується

Для застосування наведених в розділі 4 формул задаємо пружну вісь S-подібного стояка з орієнтовними розмірами, що відповідають рис. 3. При цьому можуть бути різні варіанти. На рис. 4 наведено два можливі варіанти із деякими спільними параметрами. Частини 1 стояка обох варіантів є дугами кіл однакового радіуса, а частини 2 – різних радіусів. Також однаковими є висота $H=0,5$ м і кут входження у ґрунт $\beta=45^\circ$. Точка B є межею між дугами 1 і 2.

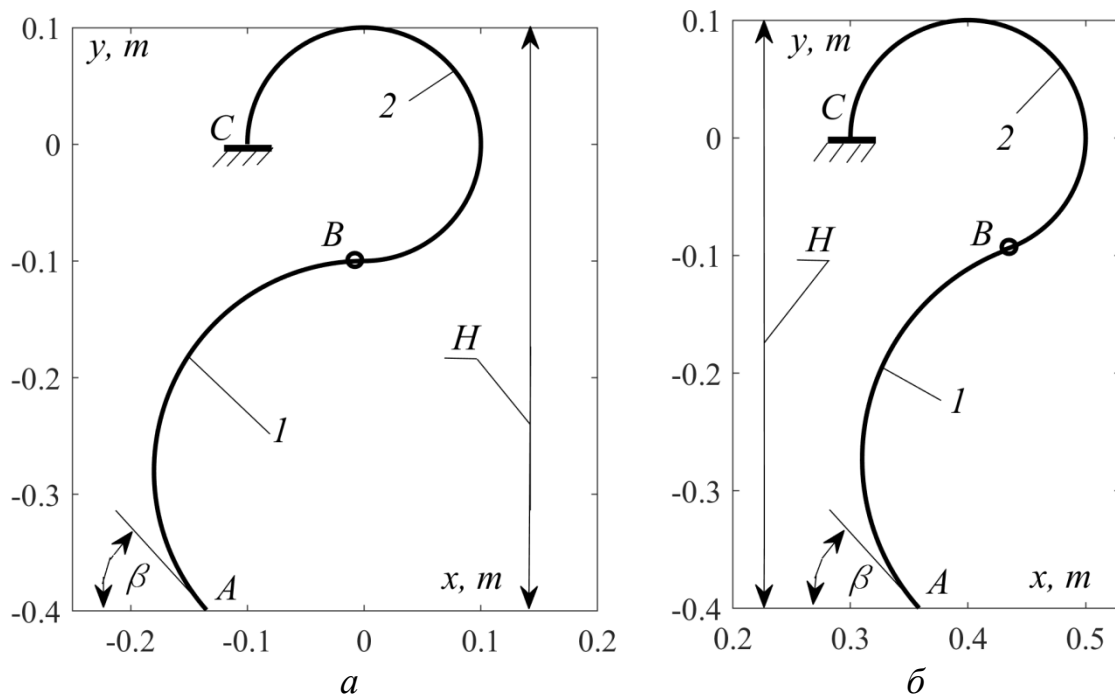


Рис. 4. Два різних варіанти пружної осі S-подібного стояка із деякими спільними параметрами:

- а) радіус дуги AB $r_1=0,18$ м, її довжина $s_1=0,415$ м; радіус дуги BC $r_2=0,1$ м, її довжина $s_2=0,471$ м;
 б) радіус дуги AB $r_1=0,19$ м, її довжина $s_1=0,365$ м; радіус дуги BC $r_2=0,1$ м, її довжина $s_2=0,443$ м

Розглянемо спочатку деформацію пружної осі нижньої частини стояка, тобто дуги AB (рис. 4). Будемо вважати, що вона консольно закріплена в точці B і під дією сил опору ґрунту розгинається, тобто її кривина зменшується. В такому випадку потрібно скористатися рівнянням (4). Жорсткість EI можна визначити, виходячи із форми поперечного перерізу стояка і його матеріалу, якою є пружинна сталь. Згідно рис. 3 верхня частина стояка (дуга BC) має прямокутний переріз $0,01 \times 0,032$ м. Модуль Юнга пружинної сталі $E=2,2 \cdot 10^{11}$ Н/м². Момент інерції прямокутного перерізу визначається за формулою $I=a^3 \cdot b/12$, де a і b – сторони прямокутника, причому для нашого випадку меншою стороною є $a=0,01$ м. Після множення знаходимо: $EI=586,67$ Н·м². Нижня частина стояка (дуга AB) має іншу форму перерізу, яка, очевидно, збільшує жорсткість. В нашому дослідженні будемо вважати, що жорсткість однакова для обох частин стояка. Інтегруванням виразу (4) знаходимо:

$$\alpha = k_0 s - \frac{Ps^2}{2EI} \quad (6)$$

Будемо вважати, що сила опору ґрунту в певний момент часу становить $P=500$ Н. Інші дані ($k_0=1/r_1=1/0,18=5,556$, $s=0,415$) беремо із підпису до рис. 4. Підстановкою цих даних у формулу (6) знаходимо: $\alpha=2,3-0,073=2,227$ рад. Кут 2,3 рад. або 132° утворений між дотичними до

кривої AB в крайніх точках A і B , а на кут $0,073 \text{ рад.}$ або на $4,2^\circ$ розгинається пружна вісь під дією прикладеної сили $P=500 \text{ Н}$ в точці A .

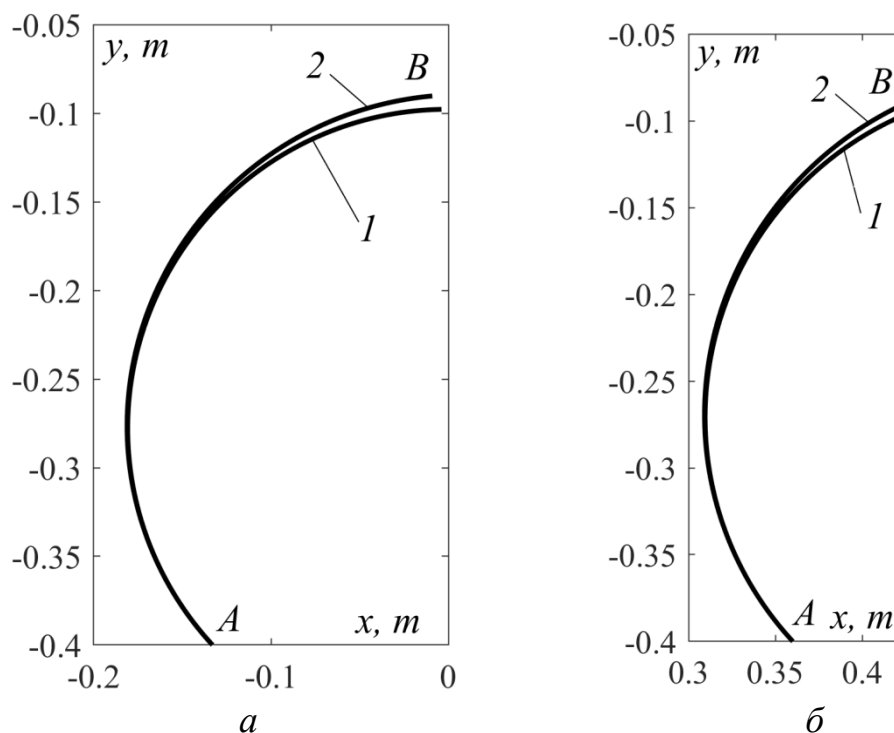


Рис. 5. Пружна вісь нижньої частини стояка (дуга AB) до деформації – 1 і після деформації – 2:

- а) дуга стояка, яка відповідає рис. 4, а;
- б) дуга стояка, яка відповідає рис. 4, б;

Для побудови пружної осі нижньої частини стояка (дуги AB) після деформації застосовується чисельне інтегрування рівнянь (5), у які підставляється вираз (6). Результат інтегрування представлено на рис. 5, а (крива 2). Аналогічно будується пружна вісь нижньої частини стояка для його другого варіанту (рис. 4, б).

Аналітичний опис згинання пружної осі верхньої частини стояка, внаслідок якого кривина осі зростає.

Верхньою частиною пружної осі стояка є дуга кола BC . В точці C стояк прикріплений до рами культиватора (рис. 4). Сила опору ґрунту через нижню частину стояка передається на верхню, яка скручується, тобто кривина пружної осі верхньої частини зростає. Отже в цьому випадку для визначення кута α потрібно застосовувати формулу (3). Вона справедлива для випадку, коли сила P прикладена в точці B . Оскільки вона прикладена в точці A , то від нижньої частини стояка до верхньої частини передається момент сили $M_1=P_1 \cdot s_1$, де s_1 є довжиною пружної осі нижньої частини AB стояка, тобто $s_1=0,415 \text{ м}$. Сила P_1 та ж сама, що діє на нижню частину стояка, тобто $P_1=500 \text{ Н}$. Отже додатково прикладений момент становить $M_1=500 \cdot 0,415=207,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$. З урахуванням додатково прикладеного моменту M_1 знайдемо кут α за формулою (3):

$$\alpha = \int \left(k_0 + \frac{P_1 s + M_1}{2EI} \right) ds = k_0 s + \frac{P_1 s^2 + 2M_1 s}{2EI}. \quad (7)$$

Кривина $k_0=1/0, l=10$, довжина дуги BC $s=0,471$ м. Отже за формулою (7) знаходимо: $\alpha=270^\circ+9,6^\circ=279,6^\circ$. Поворот пружної осі верхньої частини стояка відбувся під дією сумарного моменту відбувся на $9,6^\circ$. На рис. 6,а чисельним інтегруванням рівнянь (5) із врахуванням залежності (7) побудовано пружну вісь верхньої частини стояка після деформації. Аналогічним чином така ж вісь побудована і для другого варіанту стояка, зображеного на рис. 4, б.

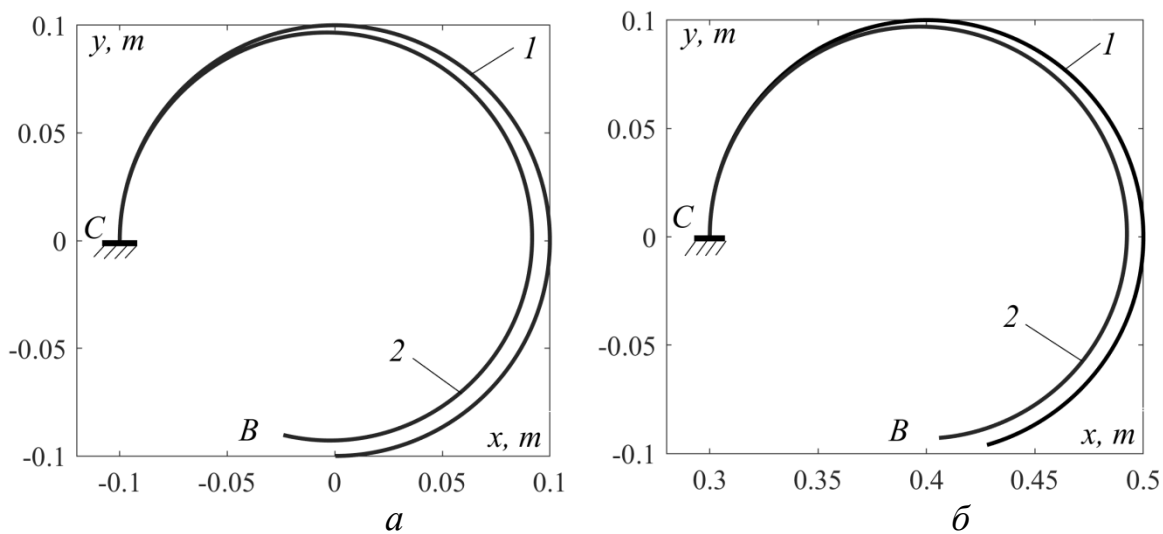


Рис. 6. Пружна вісь верхньої частини стояка (дуга BC) до деформації – 1 і після деформації – 2:

- а) дуга стояка, яка відповідає рис. 4, а;
- б) дуга стояка, яка відповідає рис. 4, б;

Суміщення пружної осі після деформації із початковою віссю до деформації відбувається за рахунок введення відповідних сталей під час чисельного інтегрування, які задають кут повороту і значення переміщення вздовж осей.

Побудова цілісної пружної осі стояка після його деформації.

На рис. 5 і 6 побудовано пружні осі стояка, який умовно був розбитий на дві частини. Для їх з'єднання в єдине ціле потрібно належним чином перемістити нижню частину до верхньої, щоб точки B збіглися і в ній була спільна дотична до обох частин пружної осі. Для цього здійснюється переміщення пружної осі нижньої частини стояка вздовж осей і її поворот на потрібний кут. Кут повороту визначається із формул (6) і (7), як додатковий кут, отриманий внаслідок деформації пружної осі із-за дії прикладеного моменту. Він є сумою кута «розгинання» величиною $4,2^\circ$ і кута «згинання» величиною $9,6^\circ$. Отже сумарний кут повороту становить $13,8^\circ$. Попереднє (у вільному стані) і нове положення пружної

осі побудовано на рис. 7. Відповідно змінюється кут входження β лапи культиватора в ґрунт: якщо у вільному стані він становив 45° (рис. 4), то після деформації він становить $45^\circ + 13,8^\circ = 58,8^\circ$.

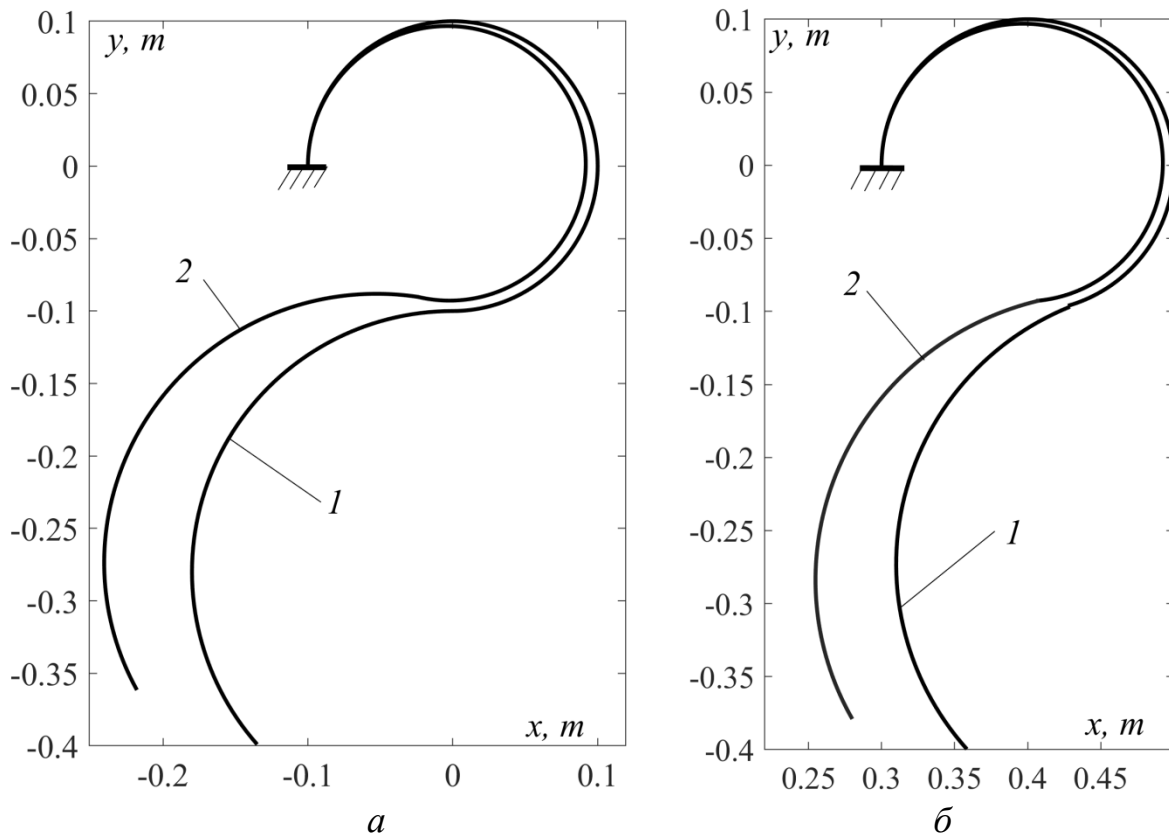


Рис. 7. Порівняння пружних осей стояків до і після деформації внаслідок прикладеної сили $P=500\text{ Н}$:

- а) сумарна довжина пружної осі стояка становить $0,886\text{ м}$;
- б) сумарна довжина пружної осі стояка становить $0,808\text{ м}$

Для другого варіанту (рис.7, б) за аналогічними підрахунками отримуємо: $45^\circ + 13,0^\circ = 58^\circ$. При цьому є різниця у відхиленні стояка в напруженому стані по висоті: у першому випадку (рис. 7, а) це відхилення становить $0,04\text{ м}$, а у другому (рис. 7,б) – вдвічі менше, тобто $0,02\text{ м}$.

Обговорення отриманих результатів моделювання пружної осі S-подібного стояка культиваторної лапи під час його роботи.

Особливість запропонованого методу полягає в умовному розділенні стояка на дві частини. В існуючих працях [2, 4] розрахунок значних прогинів стержнів здійснюється без розділення їх на частини, оскільки пружна вісь має закономірний характер зміни кривини і описується однією залежністю. Пружна вісь розглянутого S-подібного стояка складається із двох дуг кіл різної кривини, причому ці дуги мають різний знак кривини. Це призводить до того, що при роботі стояка він деформується таким чином, що кривина однієї частини зменшується, а другої зростає.

В результаті аналітичного опису деформації пружної осі кожної частини стояка було складено рівняння залежності кривини від довжини осі. Ці рівняння подібні і складаються із двох частин: кривини осі у вільному стані і напруженому. Різниця між ними полягає у знаку перед виразом кривини, яка зростає (формула (3)) або зменшується (формула (4)). Інтегруванням цих виразів знаходиться кут між дотичними в крайніх точках пружної осі, кривина якої зменшується (формула (6)) або зростає (формула (7)). При цьому враховується дія додаткового моменту, який передається від однієї частини стояка до другої. Формули (6), (7) дозволяють знайти кут α повороту дотичної в крайній точці осі внаслідок дії прикладеного моменту. Це в свою чергу дозволяє з'єднати пружні осі обох частин стояка після його деформації із спільною дотичною в точці з'єднання.

Здійснене таким чином моделювання стояка дозволяє отримати форму його пружної після деформації і порівняти із формою пружної осі у вільному стані (рис. 7). Якщо кут входження у ґрунт для обох випадків практично не змінився (58° і $58,8^\circ$), то відхилення по висоті відрізняється у два рази (2 см і 4 см). Це дає можливість задавати допустиму межу відхилення лапи від потрібного заглиблення при максимально можливій дії ґрунту на неї. Якщо прийняту силу $P=500$ Н вважати максимально можливою, то нерівномірність ходу кінця стояка складе 4 см в одному випадку (рис. 7, а) і 2 см – в другому (рис. 7, б). Це пояснюється не тільки формою стояка у вільному стані, а і довжиною його пружної осі. В другому випадку вона менша, отже менший і момент, що деформує стояка.

Отримані залежності стосуються S-подібного стояка, вісь якого у вільному стані складається із дуг кіл. В цьому полягає обмеження розглянутого матеріалу, оскільки осями можуть бути і інші криві. Позитивним моментом є те, що за заданою силою, яка діє на стояк, можна визначати його відхилення від початкового положення. Однак не можна зробити навпаки: за заданим відхиленням знаходити силу, яка спричинює це відхилення. В цьому полягає недолік дослідження.

Висновки.

Складено рівняння пружної осі верхньої частини стояка у вигляді залежності її кривини від довжини дуги. Кривина складається із суми двох складових: одна складова – це кривина осі стояка у вільному стані і друга складова – кривина, яка набувається внаслідок деформації пружної осі. Ця складова кривини зростає за лінійним законом, в результаті чого пружна вісь в цілому зростає і набуває форми спіралі. При цьому враховується передача додаткового моменту від нижньої частини стояка.

Складено рівняння пружної осі нижньої частини стояка. Як і у першому випадку, загальна кривина деформованої осі складається із двох складових, але є не сумою, а їх різницею. Це означає, що в результаті прикладеної сили до кінця пружної осі її загальна кривина зменшується.

Нижня частина стояка розгинається і його пружна вісь перестає бути колом.

Виконано чисельне інтегрування рівнянь для побудови пружних осей верхньої і нижньої частин стояка. Здійснено їх з'єднання в єдине ціле за першим порядком гладкості, тобто із спільною дотичною в точці з'єднання. Для цього за отриманими виразами був знайдений необхідний кут повороту нижньої частини пружної осі по відношенню до верхньої. Розрахунки велися за реальними розмірами стояка із врахуванням форми його поперечного перерізу і модуля Юнга матеріалу. Це дозволило порівняти форму стояка до і після деформації та визначити величину відхилення вільного кінця стояка від початкового положення.

Література

1. Пилипака С.Ф., Кресан Т.А., Хропост В.І., Бабка В.М. Пружне згинання смуги із значним прогином під дією прикладених сил та моменту. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2021. № 101. С. 137–147. Режим доступу: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.101.137-147>
2. Volina, T., Pylypaka, S., Hropost, V., Kresan, T., & Vasyliuk V. (2023). The Form of a Spiral Spring in a Free State. *Advanced Manufacturing Processes V*, 509–517. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_47
3. Арендаренко В.М., Ларенко В.В. Особливості розрахунку пружинного елемента регулятора кута атаки культиваторної лапи. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2017. № 3. С. 122–125. Режим доступу: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2017/03/30.pdf>
4. Лізунов П.П., Недін В.О. Чисельне диференціювання форм вигину пружних стержнів значної довжини. *Управління розвитком складних систем*. 2021. № 46, С. 70–75. Режим доступу: <http://mdcs.knuba.edu.ua/article/view/244933>
5. Харченко В.Є., Корсак В.І. Аналітичне розв'язання нелінійної задачі згину пружного стрижня. *Національного університету "Львівська політехніка"* 2015. № 820, С. 105–115. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2015_820_16
6. Хропост В.І., Демчук І.О. Пружне згинання криволінійної смуги із заданою початковою кривиною її пружної осі. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2023. № 104. С. 183–189. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/283912>
7. Рекламна інтернет-сторінка компанії «Техновік». Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p867775419-stojka-kultivatora-14170000301.html>

Ph. D., prof **Serhiy Pylypaka**,
s.pylypaka@nubip.edu.ua ORCID 0000-0002-1496-4615

Ph. D., prof **Victor Nesvidomin**,
vnesvidomin@nubip.edu.ua ORCID 0000-0002-1495-1718

Ph. D., assoc. prof **Tetiana Kresan**,
tanyakresan@i.ua ORCID 0000-0002-8280-9502

Postgraduate Student **Vyacheslav Hropost**,
hropost97@ukr.net ORCID 0000-0001-9363-3955

Ph. D., assoc. prof **Vitaliy Babka**
babka.v.m@gmail.com ORCID 0000-0003-4971-4285

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

CONSTRUCTING A MODEL OF THE AXIS FORM IN A S-SHAPED RISER OF A CULTIVATOR PAW

When cultivating the soil, the cultivator foot is subjected to a force of resistance to its movement. It is of variable magnitude and causes a moment of force applied to the foot riser. Under the action of the moment, the elastic axis of the riser changes its shape. This affects the position of the foot in the soil. The shape of an S-shaped riser is considered, the elastic axis of which consists of two arcs of circles of the same radius. During the operation of the cultivator, one part of the riser bends, increasing the curvature of the elastic axis, and the other, on the contrary, unbends, i.e. its curvature decreases. The modeling of the shape of the elastic axis of the foot riser is based on the position of the theory of resistance of materials, according to which the curvature of the elastic axis of a cantilevered clamped strip is directly proportional to the applied moment and inversely proportional to its stiffness. If the shape of the cross-section of the riser along its entire length is unchanged and the properties of the metal are also the same, then the stiffness is constant. For small deflections of the strip, the linear bending theory is used, but the deflections in the riser are significant, so for this case, the nonlinear theory is used. In this case, it is taken into account that the elastic axis of the riser already has an initial curvature.

If a cantilevered straight strip is bent by a force applied perpendicular to its free end, the strip will bend. When it is deformed, the force remains perpendicular to the end of the strip, although in a fixed coordinate system it changes its direction. Such a force is called a follower. When the cultivator is working, a force appears that is applied to the paw. The component of this force perpendicular to the end of the riser and transmitted to it from the paw will be considered as a follower.

To model the shape of the elastic axis of the S-shaped riser of the paw, the deformation of the arcs of circles that form this paw was separately calculated. The moment of force at the current point of the elastic axis of the riser was calculated as the product of the following force applied to the riser at the point of attachment to the leg, by a distance that is the length of the elastic axis from this to the current point on the riser. Numerical integration methods were used to find the shape of the deformed elastic axes of both parts of the riser. Then they were combined into one whole and the deformed elastic axis of the S-shaped riser was obtained.

Keywords: deformation, curvature, flexion, springing, arc of circle, force moment, rigidity.